



Получено: 22.10.2024 г. | Принято: 25.10.2024 г. | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2024.17.7-8.444.453>

Научная статья

СОЗДАНИЕ МНОГОСЛОЙНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ДИНАМИКИ КИРАЛЬНЫХ СПИНОВЫХ СТРУКТУР

А.В.Телегин¹, к.ф.-м.н., нач. лаб., рук. проекта, ORCID: 0000-0001-7209-4307 / telegin@imp.uran.ru

Т.Н.Павлов¹, вед. электронщик, ORCID: 0009-0004-5667-7616

В.М.Цвелиховская¹, мл. науч. сотр., ORCID: 0009-0000-4959-5701

Ж.Ж.Намсараев², инж.-иссл., ORCID: 0009-0004-1064-7948

В.А.Антонов², инж.-иссл., ORCID: 0009-0001-0015-2413

А.В.Огнев³, д.ф.-м.н., проф., проректор, ORCID: 0000-0002-1619-3666

Аннотация. С помощью установок магнетронного напыления, контактной и бесконтактной фотолитографии изготовлены тонкопленочные структуры с токопроводящими контактами разного профиля на основе металлических наноструктур типа тяжелый металл-ферромагнетик. Из данных по намагниченности и спинового эффекта Холла определены параметры эффективного перемагничивания и величина токоиндуцированного поля. Проведено моделирование токоиндуцированной динамики скирмионов для ферро- и ферримагнитных слоев. Результаты работы представляют интерес для изучения спин-транспортных эффектов и разработки методов управления спиновыми текстурами в многослойных пленках, перспективных для создания новых электронных элементов.

Ключевые слова: металлические наноструктуры, спиновый эффект Холла, токоиндуцированные эффекты, скирмионы, спинтроника

Для цитирования: А.В. Телегин, Т.Н. Павлов, В.М. Цвелиховская, Ж.Ж. Намсараев, В.А. Антонов, А.В. Огнев. Создание многослойных металлических пленок для изучения динамики киральных спиновых структур. НАНОИНДУСТРИЯ. 2024. Т. 17. № 7-8. С. 444-453. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2024.17.7-8.444.453>.

Received: 22.10.2024 | Accepted: 25.10.2024 | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2024.17.7-8.444.453>

Original paper

DEVELOPMENT OF MULTILAYER METAL FILMS FOR STUDYING THE CHIRAL SPIN STRUCTURES DYNAMICS

A.V. Telegin¹, Cand. of Sci. (Physics and Mathematics), Head of Laboratory, ORCID: 0000-0001-7209-4307 / telegin@imp.uran.ru

T.N. Pavlov¹, Leading Electronics Engineer, ORCID: 0009-0004-5667-7616

V.M. Tsvelikhovskaya¹, Junior Researcher, ORCID: 0009-0000-4959-5701

Zh.Zh. Namsaraev², Research Engineer, ORCID: 0009-0004-1064-7948

V.A. Antonov², Research Engineer, ORCID: 0009-0001-0015-2413

A.V. Ognev³, Doct. of Sci. (Physics and Mathematics), Prof., Deputy Rector, ORCID: 0000-0002-1619-3666

¹ ФГБУН Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия / M.N. Mikheev Institute of Metal Physics UB of RAS, Ekaterinburg, Russia

² Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, Россия / Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

³ Сахалинский государственный университет, г. Южно-Сахалинск, Россия / Sakhalin State University, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia



Abstract. Using magnetron sputtering, contact and photolithography installations, thin-film structures with conductive contacts of different profiles based on metal nanostructures of the heavy metal-ferromagnet type were manufactured. The parameters of the effective magnetization reversal and the magnitude of the current-induced field were determined from the magnetization and spin Hall effect measurements. The current-induced dynamics of skyrmions for ferro- and ferrimagnetic layers was simulated. The results of the work are of interest for studying spin-transport effects and developing methods for controlling spin textures in multilayer films, promising for creating new electronic elements.

Keywords: metallic nanostructures, spin Hall effect, current-induced effects, skyrmions, spintronics

For citation: A.V. Telegin, T.N. Pavlov, V.M. Tselikhovskaya, Zh.Zh. Namsaraev, V.A. Antonov, A.V. Ognev. Development of multilayer metal films for studying the chiral spin structures dynamics. NANOINDUSTRY. 2024. Vol. 17. No. 7-8. PP. 444-453. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2024.17.7-8.444.453>.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из перспективных направлений развития электроники является спинтроника (спиновая электроника), в которой манипулируют не переносом заряда, а особым квантовым состоянием электрона, связанным с его спином или внутренним магнитным моментом [1]. С технологическим прогрессом в области синтеза планарных тонкопленочных наноразмерных структур и фундаментальными исследованиями на стыке наномagnetизма и спинтроники связано формирование и других многообещающих направлений – спин-орбитроника [2] и скирмионика [3]. К актуальным задачам спин-орбитроники относят исследование природы магнетизма в спиновых системах с сильной спин-орбитальной связью и взаимодействием Дзялошинского – Мория (ВДМ) [4]. Преимущество спин-орбитроники состоит в том, что функциональность создаваемых устройств (например, магнитной памяти) обеспечивается непосредственно через управление спин-орбитальным взаимодействием в составляющих их наноматериалах, например, в тяжелых металлах платиновой группы (Ru, Rh, Pd, Ir, Pt). Если один из таких металлов привести в контакт с тонкой, толщиной в несколько атомных слоев, магнитной пленкой (например, Co, Ni, Fe, Py), можно радикально поменять электронные и магнитные свойства системы [5, 6].

С наличием антисимметричного взаимодействия Дзялошинского – Мория в тонкопленочных наноструктурах связано существование нетривиальных спиновых текстур, например скирмионов, которые изучает скирмионика [7, 8]. Скирмионы представляют собой магнитные вихри субмикронных и нанометровых размеров, в центре которых намагниченность противоположна направлению намагниченности на периферии. Топологическая устойчивость и более быстрая динамика по сравнению, например, с цилиндрическими магнитными

доменами, делает скирмионы весьма перспективными кандидатами для разработки энергонезависимой памяти и систем обработки информационного сигнала нового поколения [9]. В последние годы были обнаружены и интенсивно изучаются скирмионы в тонких металлических пленках типа тяжелый металл/ферромагнетик при комнатной температуре [4, 6, 10]. С помощью уникальной оптической методики мандельштам-бриллюэновского рассеяния света в ультратонких магнитных пленках с толщинами меньше одного нанометра удалось определить параметры спинового спин-волнового транспорта и динамику скирмионов [11]. В других исследованиях было также показано, что скирмионами можно управлять, воздействуя на них электрическим током [12].

Однако потенциальному внедрению устройств на основе скирмионно-подобных структур препятствует недостаток данных о природе таких топологических состояний и взаимосвязи с ВДМ, отсутствие надежных методов контроля над зарождением и управления движением и/или размерами скирмионов. Для этого необходим активный поиск новых экспериментальных методик, материалов и структур, которые бы являлись наиболее оптимальными для этих целей при комнатной температуре. Поэтому важными задачами для дальнейшего развития спин-орбитроники и скирмионики являются разработка методик синтеза многослойных металлических пленок, разработка методов оценки ВДМ, а также выявление эффективных способов управления динамикой скирмионов в магнитных наноструктурах разного типа и состава.

Благодаря развитию компьютерных технологий фундаментальные исследования и прикладные исследования в физике магнетизма наноструктур успешно проводятся численными методами. Например, программные пакеты для микромагнитного моделирования, такие как Mumax3 [13],

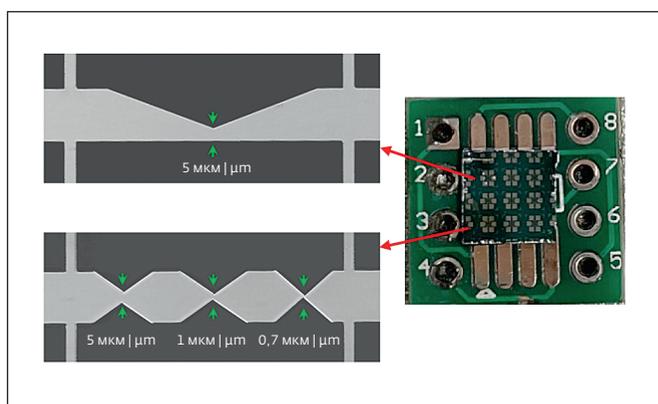


Рис.1. Пример токопроводящих холловских структур на образцах пленок (слева) и фото чипа с образцами (справа)
Fig.1. An example of conductive Hall structures grown on thin-film samples (on the left) and an example of a final chip release (on the right)

позволяют рассчитать статические и динамические магнитные свойства структур во внешних полях, определить параметры зарождения, условия стабилизации и описать динамику скирмионного распределения намагниченности [14, 15], в том числе токоиндуцированную динамику [16], которая представляет большой интерес и с точки зрения практических приложений [3, 9, 10, 17].

В данной работе приводится краткое описание использованной методики синтеза многослойных контактных наноструктур "тяжелый металл-ферромагнетик". Разработаны методы управления магнитным состоянием и спиновой конфигурацией наноструктур, путем квазилокальной спиновой инжекции тока. Рассмотрены вопросы динамики скирмионов в таких структурах.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе рассматривались многослойные наноструктуры на основе металлических сплавов (Pt,Ru)/(Co,Tb) с толщинами отдельных слоев порядка нескольких нанометров (табл.1). Образцы были получены на подложках кремния с помощью сверхвысоковакуумного комплекса Omicron. Скорость осаждения контролировалась с помощью кварцевого измерителя толщин и составляла: $V_{Pt}=0,05$ нм/с, $V_{Co}=0,02$ нм/с, $V_W=0,015$ нм/с, $V_{Ru}=0,018$ нм/с [18]. Структурные исследования образцов проводились методом рентгеноструктурного анализа с помощью рентгеновского дифрактометра D8 Advance. Было установлено, что все полученные образцы являются поликристаллическими. Среднеквадратичная шероховатость поверхности образцов составила порядка трех-пяти ангстрем. Исследование электрофизических свойств проводилось на микротекстурированных

пленках с контактами. Для этого на образцах методами контактной литографии на установке Suss Microtec MJB4 и электронно-лучевой фотолитографии на основе сканирующего электронного микроскопа Scios 2 DualBeam с приставкой Raith был сформирован трафарет структур Холла с длиной токовода 200 мкм трех типов. Первый тип: постоянная толщина токопроводящей части – 20 мкм. Второй тип – токовод с обеих сторон сужается к центру до ширины 5 мкм для создания градиента плотности тока. Третий тип: на токовоме создано три последовательных сужения размером 5, 2 и 0,7 мкм для достижения максимальных плотностей тока (рис.1).

Для лучшей адгезии электрических микровыводов на образцах с помощью установки термического напыления был нанесен слой Ti/Au. Итоговые образцы пленочных структур размещались на кремниевом чипе (подложке) и разваривались методом ультразвуковой сварки по методу "клин-клин" 20-микронной алюминиевой проволокой. К выводам чипа были подведены медные контакты. Исследование магнитных свойств (намагниченность насыщения, коэрцитивная сила и т.п.) проводилось с помощью вибрационного магнетометра LakeShore 7401 VSM. Для определения процессов перемангничивания, оценки размера доменов и анализа токоиндуцированных процессов в образцах сплошных пленок и пленок с контактами использовались данные оригинальной установки на базе Керр-микроскопа Evico Magnetics.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОКОИНДУЦИРОВАННЫХ ЭФФЕКТОВ В НАНОСТРУКТУРАХ

Из экспериментальных данных полевой зависимости намагниченности для всех образцов была получена типичная прямоугольная петля магнитного гистерезиса с осью легкого намагничивания перпендикулярно пленке [19, 20]. На основе данных по намагниченности в полях разной ориентации были рассчитаны магнитные параметры каждого образца: намагниченность насыщения M_s и коэрцитивная сила, энергия и поле магнитной анизотропии. Удельное электросопротивление исследуемых наноструктур составило порядка 10^{-6} Ом·см. Как было показано, например, в [21], пропускание постоянного тока в металлических наноструктурах приводит к индуцированию эффективного магнитного поля в ферромагнитном (ФМ) слое вследствие спинового эффекта Холла, который возникает в слое тяжелого металла (ТМ). Так как в многослойных структурах ток течет не только через слой ТМ, но также и через ФМ, для оценки эффективности токоиндуцированного перемангничивания в многослойной проводящей наноструктуре была проведена оценка



Таблица 1. Магнитные и электрические характеристики образцов наноструктур
 Table 1. Magnetic and electrical characteristics of nanostructure samples

Состав образца (толщина слоя в нм) Sample composition (layer thickness, nm)	M_s , А/м А/м	H_a , мТл мТ	K_u , Дж/м ³ Дж/м ³	H_c , мТл мТ	I_c , мА мА	β , Тл/А Тл/А	ξ
Ru(10 нм)/Co(0,8)/Ru(2)	0,51e6	450	0,43e5	2,9	35	12e-3	0,09
W(4)/Tb30Co70(6)/Ru(2)	0,21e6	900	0,9e5	116,5	31	208e-3	1,82
Pt(5)/Co(0,8)/MgO(2)/Pt(2)	0,8e6	600	1.67e5	74	40	166e-3	0,32

Магнитные и электрические характеристики образцов наноструктур: M_s – намагниченность насыщения, H_a – поле анизотропии, K_u – энергия магнитной анизотропии, H_c – коэрцитивная сила, I_c – ток переключения, β – удельное токоиндуцированное поле, ξ – эффективность токоиндуцированного перемагничивания

доли тока, проходящего через слой ТМ с использованием модели параллельных резисторов. Для всех типов полученных структур порядка 90–95% тока протекает через слои ТМ. При этом токовая эффективность многослойной структуры составляет более 50%. Исследование поведения намагниченности в наноструктурах при пропускании тока с помощью Керр-микроскопа позволило определить величину тока, при котором происходит переключение намагниченности I_c , и плотность тока переключения j . Зная сопротивление образцов со структурой Холла, размеры токопроводящей части и состав, были рассчитаны удельное сопротивление и доля тока, проходящая через слой, индуцирующий спинполяризованный ток. Для всех структур с сужением тоководов минимальная наблюдаемая плотность тока переключения составила $3 \cdot 10^{11}$ А/м² (при критической величине тока 20–40 мА). Основные результаты расчетов приведены в табл.1. Более детально с методикой оценки можно ознакомиться в работе [19].

Для оценки эффективности токоиндуцированного перемагничивания наноструктур проводилась регистрация поперечной разности потенциалов при пропускании тока во внешних магнитных полях, используя полученные на образцах структуры Холла. В этом случае протекающий ток будет индуцировать дополнительное эффективное магнитное поле B_s , перпендикулярное плоскости образца, а петля гистерезиса в эффекте Холла будет смещаться влево или вправо на эту величину, в зависимости от направления пропускания тока (рис.2).

Исследуя величину этого смещения от силы тока в образцах, была построена зависимость, которая определяет коэффициент пропорциональности β между током, пропускаемым через структуру, и индуцированным им полем (в присутствии постоянного магнитного поля в плоскости образца). Используя полученные коэффициенты β , B_s , M_s ,

согласно [22, 23], была рассчитана эффективность токоиндуцированного перемагничивания синтезированных металлических многослойных наноструктур по формуле:

$$\xi = \frac{2e}{\hbar} M_s t_F \frac{B_s}{j}, \quad (1)$$

где e – заряд электрона, \hbar – приведенная постоянная Планка, t_F – толщина магнитного слоя, j – плотность тока, протекающего через структуру, B_s – токоиндуцированное эффективное поле.

Таким образом, полученные структуры на основе Pt/Co демонстрируют высокую эффективность спинового транспорта и являются подходящими для задач токоиндуцированного, перемагничивания. В структуре Ru/Co/Ru эффективность токоиндуцированного

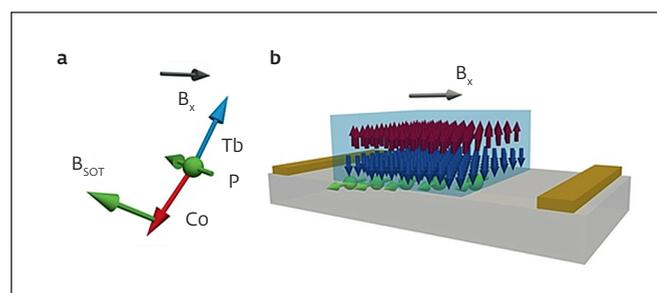


Рис.2. а – схема взаимной ориентации намагниченности в двух подрешетках M_{Co} и M_{Tb} , поляризации спинового тока p , внешнего поля B_x и индуцированного эффективного поля B_s ; б – схематическое изображение эксперимента по токоиндуцированному перемагничиванию магнитоупорядоченного слоя

Fig.2. a – schematic diagram of the mutual orientation of magnetization in two sublattices M_{Co} and M_{Tb} , polarization of the spin current p , external field B_x and induced effective field B_s ; b – schematic representation of the experiment on current-induced magnetization reversal of a magnetically ordered layer

перемагничивания мала, так как слой Ru почти не индуцирует спин-поляризованный ток. Пропускаемый через образец ток в основном влияет на магнитную структуру только посредством Джоулева нагрева. Такая структура может быть использована только как референсная. В отличие от наноструктур на основе Pt/Co и Ru/Co, имеющих заметную поверхностно-индуцированную перпендикулярную магнитную анизотропию, ферримагнитный (ФИМ) слой CoTb имеет объемную природу анизотропии. Такая особенность ФИМ позволяет использовать слои большей толщины, что обуславливает различие в магнитных и спин-транспортных свойствах образцов. Полученные результаты демонстрируют высокую перспективность ФМ и, особенно, ФИМ-наноструктур для создания и наблюдения различных токоиндуцированных эффектов, в том числе, сверхбыстрых, и изучения динамики скирмионов.

МИКРОМАГНИТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ СКЕРМИОНОВ В МАГНИТНЫХ СТРУКТУРАХ

Ранее методами микромагнитного моделирования были получены фазовые диаграммы существования скирмионов в ФМ и ФИМ [22, 24], исследовано поведение скирмионов в этих средах под действием постоянного тока в зависимости от плотности тока, энергии анизотропии, намагниченности насыщения и коэффициента демпфирования.

В данной работе было проведено исследование высокоскоростных токоиндуцированных процессов: перемагничивания и движения скирмионов под действием импульсов спинового тока в ферро- и ферримагнетиках. Для анализа ФИМ-структур использовалась полуэмпирическая модель, предложенная

ранее в работе [25]. В данной модели ФИМ-структура задается двумя слоями одинаковой и фиксированной толщины, один из которых выполняет функцию ФМ-материала, а второй – редкоземельного (РЗ). В тонкослойных пленках с перпендикулярной магнитной анизотропией, содержащих би-слой ТМ и ФМ, пропускание электрического тока может приводить к переключению ориентации намагниченности, вследствие спинового эффекта Холла. При использовании ФИМ, содержащего магнитные подрешетки, образованные атомами ФМ- и РЗ-металла, спиновый ток будет эффективно воздействовать только на первую. Взаимодействие спинового тока с локализованными магнитными моментами может быть описано в терминах эффективного поля V_s (рис.2). Его направление определяется векторным произведением $V_s = \mathbf{r} \times \mathbf{M}_{Co}$, где \mathbf{r} – вектор поляризации спинового тока, а \mathbf{M}_{Co} – ориентация намагниченности в решетке/подрешетке ФМ.

Для проверки применимости модели для наших задач сначала было проведено моделирование воздействия спинового тока на систему. Известно, что под действием спинового тока направления векторов намагниченности подрешеток меняются на противоположные. Подобное переключение было смоделировано для трех случаев в зависимости от вклада подрешеток в результирующую намагниченность: преобладание вклада ФМ-решетки, состояние компенсации, преобладание вклада РЗ-решетки (рис.3).

Видно, что действие спинового тока приводит к резкому изменению направления намагниченности каждой из подрешеток, с дальнейшей прецессией вектора вокруг оси z. Обобщением полученного результата могут служить расчетные временные диаграммы переключения намагниченности (рис.4).

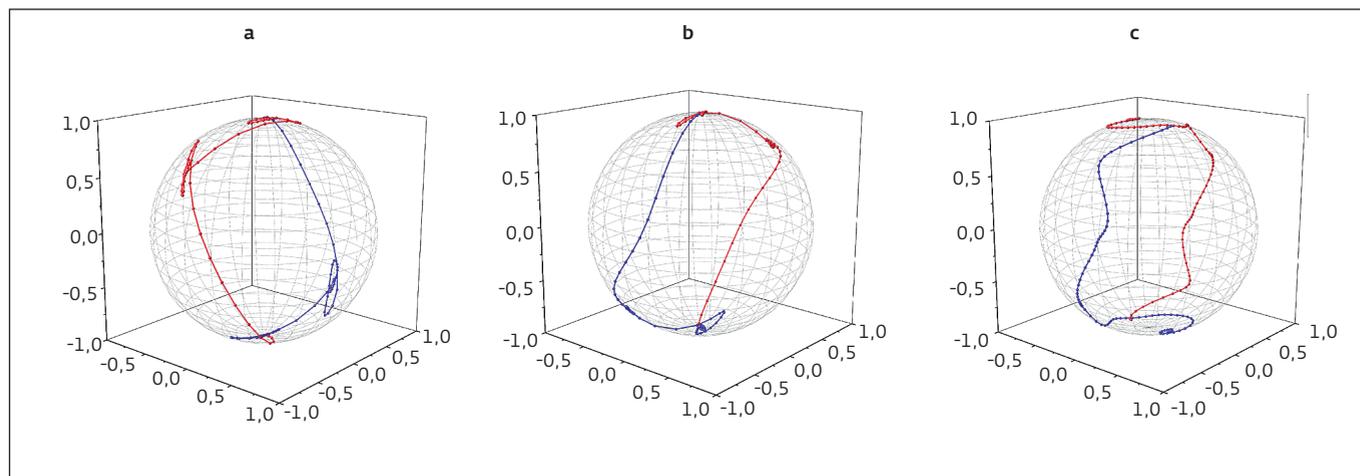


Рис.3. Переключение намагниченности подрешеток ФИМ под действием спинового тока: а – преобладание вклада ФМ подрешетки, б – состояние компенсации, с – преобладание вклада РЗ подрешетки

Fig.3. Switching of magnetization of FIM sublattices under the action of spin current: a – predominance of the contribution of the FM sublattice, b – compensation state, c – predominance of the contribution of the RE sublattice

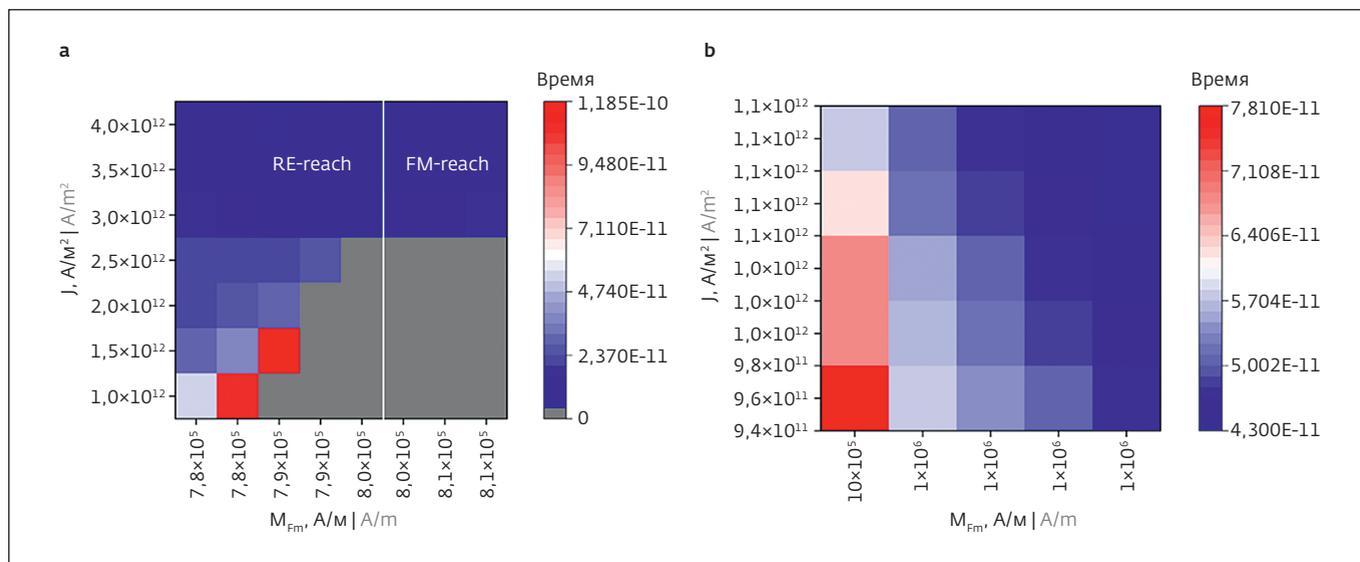


Рис.4. Диаграммы переключения намагниченности M под действием спинового тока J для ФИМ (а) и ФМ (б). Время переключения дано в цветовой шкале, где серым цветом обозначено отсутствие переключения
 Fig.4. Diagrams of switching of magnetization M under the action of spin current J for FIM (a) and FM (b). Switching time is given in color scale, where gray color indicates absence of switching

Можно заметить, что по мере увеличения вклада ФМ подрешетки, увеличивается плотность тока, необходимая для переключения слоя магнетика. На рис.5 представлены полученные расчетные зависимости проекций намагниченностей подрешеток ФИМ на ось z от времени при воздействии спинового тока.

Из рис.5 помимо подтверждения факта переключения намагниченности следует также то, что данное переключение не является

одновременным для всех подрешеток. Разница во времени составляет порядка 1 пс, что соответствует экспериментальным данным [26, 27]. Асинхронное переключение двух намагниченностей объясняется динамикой типа "мастер-агент", вызванной спин-орбитальными моментами на подрешетках переходных и РЗ-металлов, а также их слабым антиферромагнитным взаимодействием, чувствительным к микроструктуре сплава.

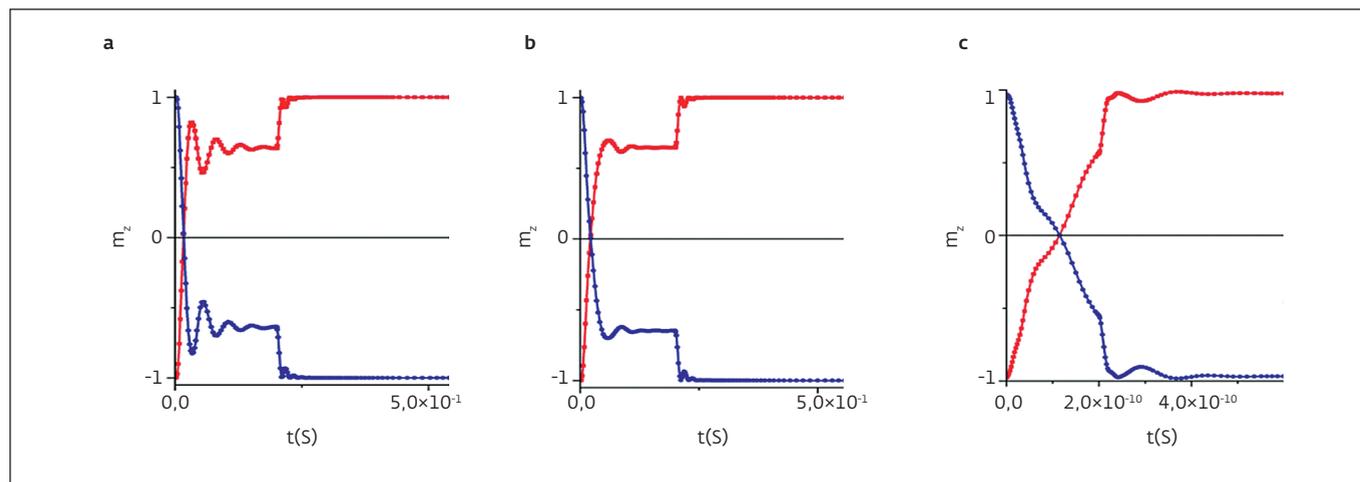


Рис.5. Переключение z-компоненты намагниченности подрешеток ФИМ под действием спинового тока: а – преобладание ФМ подрешетки, б – состояние компенсации, с – преобладание РЗ подрешетки
 Fig.5. Switching of the z-component of the magnetization of the FIM sublattices under the action of spin current: а – dominance of the FM sublattice, б – compensation state, с – dominance of the RE sublattice

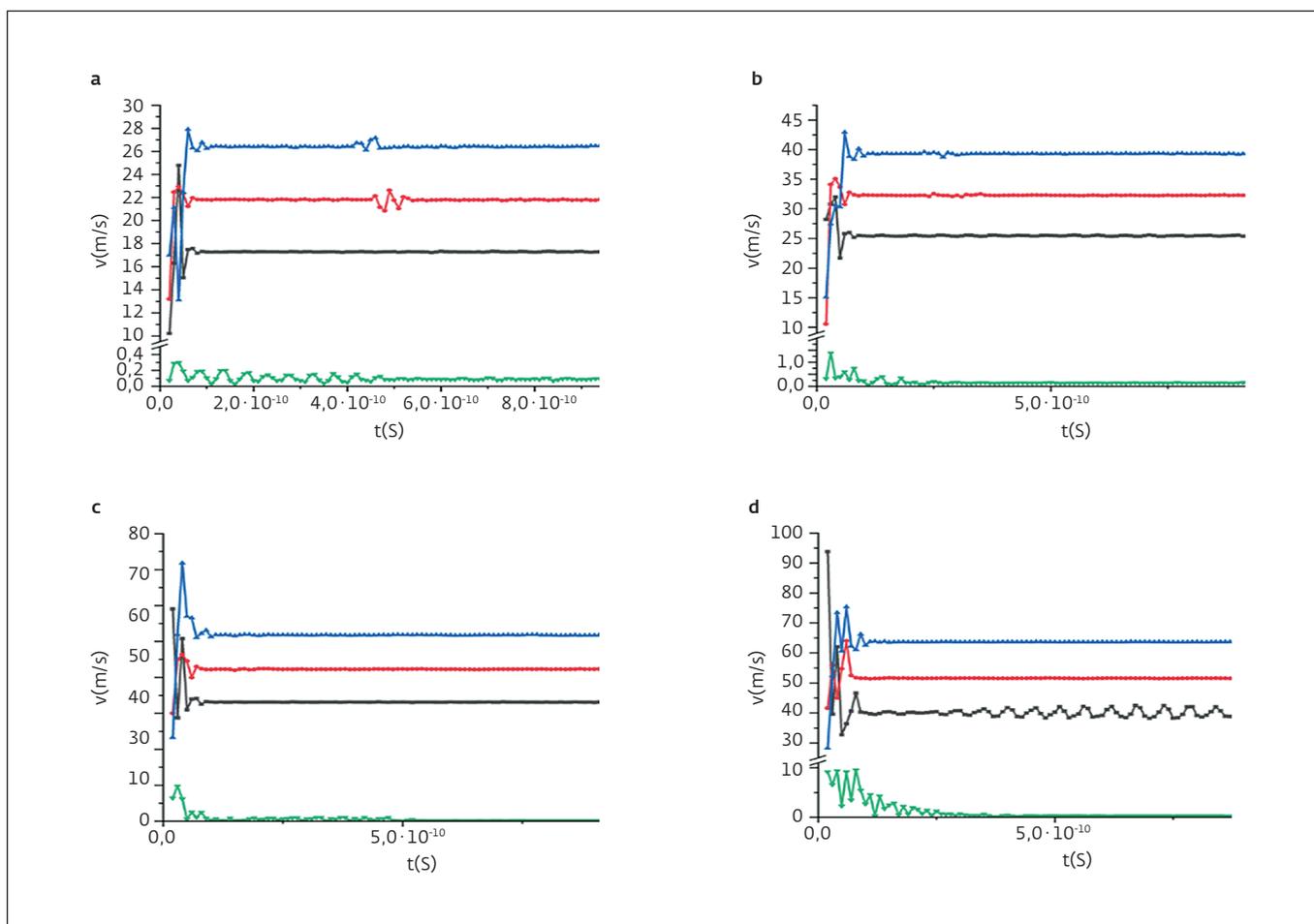


Рис.6. Изменение скорости токоиндуцированного движения скирмиона n при различных значениях плотности тока J
 Fig.6. Change in the speed of current-induced motion of the skyrmion n at different values of current density J

Для исследования и сопоставления характеристик токоиндуцированного движения скирмионов в ФМ- и ФИМ-системах было проведено соответствующее моделирование, основываясь на численной модели, предложенной в [22, 25]. В качестве измеряемого параметра выступила скорость движения скирмиона под действием тока для случаев чистого ФМ, ФИМ с преобладанием ФМ подрешетки, ФИМ в состоянии компенсации, ФИМ с преобладанием РЗ подрешетки. Результаты моделирования представлены на рис.6.

Из приведенных данных видно, что скорость токоиндуцированного движения скирмиона в ФИМ увеличивается с ростом вклада РЗ-металла в общую намагниченность. Такая зависимость может быть обусловлена отсутствием прямого обмена между атомами РЗ и, как следствие, более простым и быстрым движением доменных стенок в ФИМ по сравнению с ФМ. Также скорость движения скирмиона почти линейно растет с увеличением плотности тока. Стоит отметить, что увеличение плотности тока приводит к увеличению

отклонения скорости скирмиона от ее постоянного значения, а также к изменению поведения кривой скорости на начальном этапе движения. Для анализа последнего, была построена зависимость времени выхода скорости скирмиона на постоянное значение от плотности тока (рис.7).

Можно заметить, что наименьшее время для установления постоянной скорости токоиндуцированного движения скирмиона соответствует ФИМ в состоянии компенсации. Эта величина растет при увеличении плотности тока. Данный факт вкуче с тем, что для состояния компенсации ФИМ характерен наименьший скирмионный угол Холла, подтверждает высокую перспективность скомпенсированного ФИМ для управляемого токоиндуцированного движения скирмионов, что согласуется также с ранее полученными результатами [18, 22, 28].

ВЫВОДЫ

Методом магнетронного распыления синтезированы поликристаллические пленки



многослойных наноструктур на основе сплава Pt/Co. Отработана методика формирования контактных структур Холла переменного сечения (от 0,7 до 2 мкм) и исследованы их магнитные и магнитотранспортные свойства. Установлено, что во всех образцах наблюдается эффект токоиндуцированного воздействия на магнитную структуру, однако эффективность этого воздействия может изменяться почти на два порядка в зависимости от слоя металла. Максимальная эффективность токоиндуцированного перемагничивания была получена в ферримагнитных сплавах с РЗ-металлами, которые могут быть рекомендованы для дальнейшего исследования процессов спинового транспорта оптическими и магнитооптическими методами. Моделирование движения скирмионов также подтверждает большую перспективность ферримагнитных структур по сравнению с ферримагнитными для наблюдения пикосекундной динамики процесса в широком интервале величин спин-поляризованного тока при комнатной температуре. Полученные образцы могут использоваться для создания различных топологических спиновых текстур, а также электрического управления магнитным состоянием наноструктур. Результаты

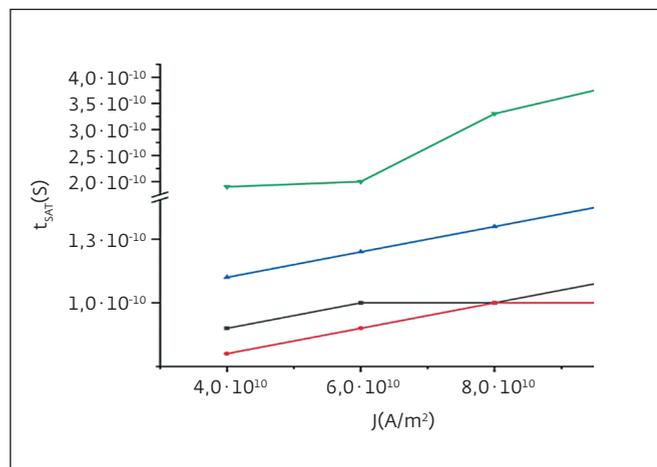


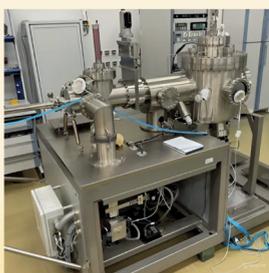
Рис.7. Время стабилизации скорости движения скирмиона в зависимости от плотности тока

Fig.7. Time of stabilization of the speed of movement of a skyrmion depending on the current density

исследования влияния токоиндуцированных эффектов на спиновую текстуру и динамику скирмионов в тонкопленочных металлических наноструктурах могут быть использованы в разработке новых планарных спин-электронных устройств.

Институт физики металлов имени М. Н. Михеева
Уральского отделения Российской академии наук

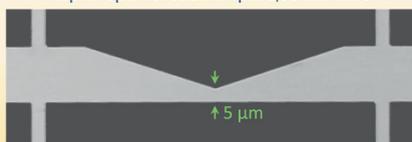
Создание и изучение динамики киральных спиновых текстур в системах тяжелый металл/(анти)ферромагнетик



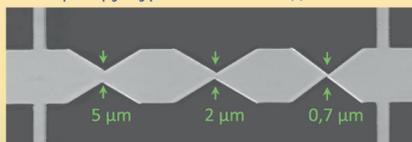
Комплекс магнетронного распыления Omicron



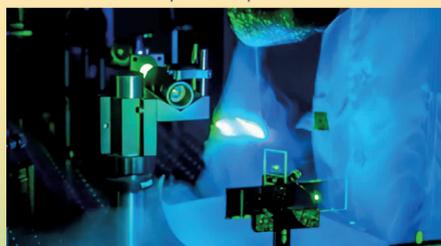
Примеры готовых образцов на чипе



Микроструктура контактов по данным SEM



Расчет плотности тока в структуре



Оптическая установка BLS для анализа спин-волновых параметров наноструктур

Контакты

Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН



620108 Екатеринбург,
С. Ковалевской, 18
physics@imp.uran.ru



Дальневосточный федеральный университет



690922 Владивосток,
п. Аякс, 10, о. Русский,
SchoolINS@dvfu.ru



При финансовой поддержке
РНФ № 21-72-20160-ОИ





БЛАГОДАРНОСТИ:

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №21-72-20160 (<https://rscf.ru/en/project/21-72-20160>). Авторы выражают благодарность за помощь в измерениях и синтезе образцов ЦКП ДВФУ.

ИНФОРМАЦИЯ О РЕЦЕНЗИРОВАНИИ

Редакция благодарит анонимного рецензента (рецензентов) за их вклад в рецензирование этой работы, а также за размещение статей на сайте журнала и передачу их в электронном виде в НЭБ eLIBRARY.RU.

Декларация о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в данной статье.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. **Фетисов Ю.К., Сигов А.С.** Спинтроника: физические основы и устройства // Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии. 2018. Т. 10. №. 3. С. 343–356.
2. **Stashkevich A.A.** Spin-orbitronics a novel trend in spin-oriented electronics // J. Russ. Univ. Radioelectron. Moscow. 2019. Vol. 22. PP. 45–54. <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2019-22-6-45-54>
3. **Fert A., Van Dau F.N.** Spintronics, from giant magnetoresistance to magnetic skyrmions and topological insulators // Comptes Rendus Physique. 2019. Vol. 20. No. 7–8. PP. 817–831. <https://doi.org/10.1016/j.crhy.2019.05.020>
4. **Wei W.S., He Z.D., Qu Z., Du H.F.** Dzyaloshinsky–Moriya interaction (DMI)-induced magnetic skyrmion materials // Rare Metals. 2021. Vol. 40. No. 11. PP. 3076–3090. <https://doi.org/10.1007/s12598-021-01746-9>
5. **Bogdanov A.N., Rößler U.K.** Chiral symmetry breaking in magnetic thin films and multilayers // Physical Review Letters. 2001. Vol. 87. No. 3. P. 037203. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.87.037203>
6. **Ma M., Pan Z., Ma F.** Artificial skyrmion in magnetic multilayers // Journal of Applied Physics. 2022. Vol. 132. No. 4. <https://doi.org/10.1063/5.0095875>
7. **Everschor-Sitte K., Masell J., Reeve R.M., Kläui M.** Perspective: Magnetic skyrmions—Overview of recent progress in an active research field // Journal of Applied Physics. 2018. Vol. 124. No. 24. <https://doi.org/10.1063/1.5048972>
8. **Fert A., Reyren N., Cros V.** Magnetic skyrmions: advances in physics and potential applications // Nature Reviews Materials. 2017. Vol. 2. No. 7. PP. 1–15. <https://doi.org/10.1038/natrevmats.2017.31>
9. **Zhang X., Zhou Y., Song K.M., Park T.E., Xia J., Ezawa M., Woo S.** Skyrmion-electronics: writing, deleting, reading and processing magnetic skyrmions toward spintronic applications // Journal of Physics: Condensed Matter. 2020. Vol. 32. No. 14. P. 143001. <https://doi.org/10.1088/1361-648X/ab5488>
10. **Ognev A.V., Kolesnikov A.G., Kim Y.J., Cha I.H., Sadovnikov A.V., Nikitov S.A., Soldatov I.V., Talapatra A., Mohanty J., Mruczkiewicz M., Ge Y., Kerber N., Dittrich F., Virnau P., Kläui M., Keun Y., Kim, Samardak A.S.** Magnetic direct-write skyrmion nanolithography // ACS Nano. 2020. Vol. 14. No. 11. PP. 14960–14970. <https://doi.org/10.1021/acsnano.0c04748>
11. **Безверхний А.И., Губанов В.А., Садовников А.В., Моргунов Р.Б.** Взаимодействие Дзюлошинского–Мория в синтетических ферромагнетиках Pt/Co/Ir/Co/Pt // Физика твердого тела. 2021. Т. 63. № 12. С. 2053–2060. <https://doi.org/10.21883/FTT.2021.12.51665.120>
12. **Ding J., Yang X., Zhu T.** Manipulating current induced motion of magnetic skyrmions in the magnetic nanotrack // Journal of Physics D: Applied Physics. 2015. Vol. 48. No. 11. P. 115004. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/48/11/115004>
13. **Vansteenkiste A., Leliaert J., Dvornik M., Helsen M., Garcia-Sanchez F., Van Waeyenberge B.** The design and verification of MuMax3 // AIP advance. 2014. Vol. 4. No. 10. <https://doi.org/10.1063/1.4899186>
14. **Bo L., Hu C., Zhao R., Zhang X.** Micromagnetic manipulation and spin excitation of skyrmionic structures // Journal of Physics D: Applied Physics. 2022. Vol. 55. No. 33. P. 333001. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ac6cb2>
15. **Gareeva Z.V., Guslienko K.Y.** Dynamics of magnetic skyrmions in nanodots // Phys. Solid State. 2018. Vol. 60. No. 6. P. 1146.
16. **Zhou Y., Iacocca E., Awad A.A., Dumas R.K., Zhang F.C., Braun H.B., Åkerman J.** Dynamically stabilized magnetic skyrmions // Nature communications. 2015. Vol. 6. No. 1. P. 8193. <https://doi.org/10.1038/ncomms9193>
17. **Kang W., Wu B., Chen X., Zhu D., Wang Z., Zhang X., Zhou Y., Zhang Y., Zhao W.** A comparative cross-layer study on racetrack memories: Domain wall vs skyrmion // ACM Journal on Emerging Technologies in Computing Systems (JETC). 2019. Vol. 16. No. 1. PP. 1–17. <https://doi.org/10.1145/3333336>
18. **Telegin A.V., Namsaraev Z.Z., Bessonov V.D., Teplov V.S., Ognev A.V.** Growth of thin-film magnetic nanostructures promising for spintron-



- ics applications непосредственный // Modern Electronic Materials. 2024. Vol. 10. PP. 51–57.
19. **Telegin A.V., Bessonov V.D., Lobov I.D., Teplov V.S.** Efficient current-induced magnetization reversal in metallic nanostructures // Physics of the Solid State. 2023. Vol. 65. PP. 2158–2167.
 20. **Kolesnikov A.G., Stebliy M.E., Ognev A.V., Samardak A.S., Fedorets A.N., Plotnikov V.S., Chebotkevich L.A.** Enhancement of perpendicular magnetic anisotropy and coercivity in ultrathin Ru/Co/Ru films through the buffer layer engineering // Journal of Physics D: Applied Physics. 2016. Vol. 49. No. 42. P. 425302. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/49/42/425302>
 21. **Sinova J., Valenzuela S.O., Wunderlich J., Back C.H., Jungwirth T.** Spin hall effects // Reviews of modern physics. 2015. Vol. 87. No. 4. P. 1213. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.87.1213>
 22. **Telegin A., Stebliy M., Ognev A. Bessonov V., Batalov S** // Indian Journal of Physics. 2024. No. 1–11.
 23. **Samardak A.S., Kolesnikov A.G., Davydenko A.V. Steblii M.E., Ognev A.V.** Topologically Nontrivial Spin Textures in Thin Magnetic Films // Phys. Metals Metallogr. 2022. Vol. 123. PP. 238–260. <https://doi.org/10.1134/S0031918X22030097>
 24. **Kuchkin V.M., Chichay K., Barton-Singer B., Rybakov F.N. Blügel S., Schroers B.J., Kiselev N.S.** Geometry and symmetry in skyrmion dynamics // Physical Review B. 2021. Vol. 104. No. 16. P. 165116.
 25. **Batalov S.V., Bessonov V.D., Teplov V.S., Telegin A.V.** An equivalent model for micromagnetic simulation of the magnetization of ferrimagnetic structures // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. 2024. Vol. 4. PP. 35–46. <https://doi.org/10.17804/2410-9908.2024.4.035-046>
 26. **Sala G., Lambert C.H., Finizio S., Raposo V., Krizakova V., Krishnaswamy G., Weigand M., Raabe J., Marta D. Rossell, Martinez E., Gambardella P.** Asynchronous current-induced switching of rare-earth and transition-metal sublattices in ferrimagnetic alloys. Nature Materials. 2022. Vol. 21. No 6. PP. 640–646.
 27. **Guan S.H., Liu Y., Hou Z.P., Chen D.Y., Fa Z., Zeng M., Liu J.M.** Optically controlled ultrafast dynamics of skyrmion in antiferromagnets. Physical Review B. 2023. Vol. 107. No. 21. P. 214429.
 28. **Kim S.K., Beach G.S., Lee K.J., Ono T., Rasing T., Yang H.** Ferrimagnetic spintronics // Nature materials. 2022. Vol. 21. No. 1. PP. 24–34. <https://doi.org/10.1038/s41563-021-01139-4>



ФГУП "ЦНИИХМ" – 130 ЛЕТ

В 2024 году Государственный научный центр Российской Федерации ФГУП "Центральный научно-исследовательский институт химии и механики" отмечает свой 130-летний юбилей. Неоднократно меняя свое наименование, институт на протяжении всей своей истории оставался и остается верным главному предназначению – разработке новых, эффективных средств вооружения и военной техники в интересах укрепления обороноспособности страны и безопасности государства. С момента своего основания в 1894 году в виде Специальной химической лаборатории при Охтинском пороховом заводе наш институт прошел долгий и славный путь преобразований, инноваций и достижений. Сегодня ФГУП "ЦНИИХМ" – это мощный научный и производственный комплекс, который вносит огромный вклад в развитие химической, механической и оборонной отраслей нашей великой страны.

Одним из интенсивно развивающихся направлений института является создание изделий на основе нанотехнологий и микросистемной техники.

Примерами разработок являются: микромеханические инерциальные датчики и модули на их основе, инфракрасные детекторы, тонкопленочные магнитометры, солнечные датчики, пленочные тепловые излучатели, твердотопливные микродвигатели и прочие прецизионные датчики и актюаторы в микроминиатюрном исполнении. Применение указанных изделий обеспечивает новые качества аппаратуры и решение задач импортозамещения

компонентов потребительской электроники, систем Интернета вещей и домашней автоматизации, систем управления и безопасности автомобильного, железнодорожного и авиационного транспорта, систем контроля состояния промышленных зданий и сооружений, а также создания новых типов автоматизированных устройств медицинского применения.

С целью ускорения процессов изготовления и проведения технологических обработок на новом уровне активно внедряются аддитивные технологии, прототипирование и цифровые двойники.

Создана и функционирует научная школа "Нано- и микросистемная техника для систем безопасности", результатом работы которой являются активное вовлечение в проблематику разработок высококвалифицированных ученых и молодых активных специалистов, регулярно защищаемые диссертации на соискание ученых степеней, публикации материалов исследований и разработок в ведущих научных изданиях. Фундаментальный научный подход и оригинальность решения технологических задач позволили коллективу достичь результатов, имеющих важное политическое и народно-хозяйственное значение для обеспечения обороноспособности и безопасности Российской Федерации.

Генеральный директор ФГУП "ЦНИИХМ"
академик РАН, доктор технических наук, доцент
Бобков Сергей Алексеевич